

## 水工程安全监测智能化面临的挑战、目标与实现路径

卢正超, 杨宁, 韦耀国, 黎利兵, 聂鼎, 姜云辉

### Intelligent water engineering safety monitoring: challenges, goals and roadmap

LU Zhengchao, YANG Ning, WEI Yaoguo, LI Libing, NIE Ding, JIANG Yunhui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20201210003>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 关于智慧水利的认识与思考

Understanding and thinking of smart water conservancy

水利水电工程学报. 2019(6): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.001>

##### 大坝安全监测系统评价体系

Technical framework for dam safety monitoring system evaluation

水利水电工程学报. 2019(4): 63 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.009>

##### 基于安全监测的水闸健康诊断体系研究

Analysis of sluice health diagnosis system based on safety monitoring

水利水电工程学报. 2018(5): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.001>

##### PFMA在混凝土面板堆石坝安全监测优化布置中的应用

Application of PFMA in safety monitoring of concrete face rockfill dams

水利水电工程学报. 2021(2): 124 <https://doi.org/10.12170/20201120001>

##### 基于GIS的大型灌区移动智慧管理系统研发

Development of mobile intelligent management system for large-scale irrigation district based on GIS

水利水电工程学报. 2019(4): 50 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.007>

##### 我国新型城镇化进程中水问题及对策

Water problems and countermeasures during the process of new urbanization in China

水利水电工程学报. 2017(6): 104 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.015>



扫码进入官网, 阅读更多精彩内容



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20201210003

卢正超, 杨宁, 韦耀国, 等. 水工程安全监测智能化面临的挑战、目标与实现路径 [J]. 水利水运工程学报, 2021(6): 103-110. (LU Zhengchao, YANG Ning, WEI Yaoguo, et al. Intelligent water engineering safety monitoring: challenges, goals and roadmap[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(6): 103-110. (in Chinese))

# 水工程安全监测智能化面临的挑战、目标与实现路径

卢正超<sup>1,2</sup>, 杨宁<sup>3</sup>, 韦耀国<sup>4</sup>, 黎利兵<sup>2</sup>, 聂鼎<sup>2</sup>, 姜云辉<sup>2</sup>

(1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院水电中心, 北京 100038; 3. 中国三峡建设管理有限公司, 四川 成都 610000; 4. 南水北调中线干线建设管理局, 北京 100038)

**摘要:** 近年来我国的水利信息化已取得长足进步, 智慧水利建设即将步入高潮, 但各应用系统的具体建设目标、标准与技术路线等仍在探索中。水工程安全监测智能化是智慧水利的重要组成部分, 其现实目标的边界取决于人工智能技术的成熟度。考虑到人工智能技术的现状并基于数十年大坝安全监测实践的经验, 系统分析了水工程安全监测智能化面临的挑战, 提出了水工程安全监测智能化的“三度”理念, 合理的近期目标及“四化”路线。首先, 需要从哲学的高度来把握“应该做什么”和“能够做什么”, 从理性的角度即技术、经济、安全诸方面来衡量其合理的范围和程度, 并自始至终秉承真诚的态度将其做好做实。其次, 水工程安全监测智能化应聚焦于工程风险与结构抗力及安全相关信息的需求与有效供给两大矛盾, 智能化的标准是对工程既有缺陷隐患看得见、说得清, 未来安全风险想得透、管得住。第三, 在监测自动化的基础上实现全信息化、可视化和模型化, 是超越常规信息化、实现水工程安全监测智能化的关键。贯彻落实好这些理念, 将为智慧水利的成功实施打下坚实的基础。

**关键词:** 水工程; 安全监测智能化; 信息化; 智慧水利

**中图分类号:** TP391

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2021)06-0103-08

信息化是当今世界发展的大趋势, 也是产业优化升级、实现现代化的关键环节。近年来, 以水利信息化带动水利现代化已成为共识并全面落地<sup>[1-7]</sup>。水利部规划到 2025 年要建成水资源、水生态水环境、水灾害、水工程、水监督、水行政、水公共服务、综合决策、综合运维等九类智能应用。2020 年 5 月, 水利部启动智慧水利先行先试工作, 开展实施 36 项先行先试任务。张建云等<sup>[1]</sup>提出: 信息是智慧水利的基础, 知识是智慧水利的核心, 能力提升是智慧水利的目的。但关于智慧水利各应用系统智能化的具体目标、判断标准与技术路线, 目前仍在探索中。就水工程安全监测而言, 目前国内相关的信息化及智能化实践尚存在以下问题:

(1) 很多水工程安全监测体系的针对性不强。风险分析的理念在国内工程安全监测中应用很少, 相关规范对水工程风险分析及失效模式分析等均未提出明确要求。监测设计中为监测而监测的倾向明显, 不少监测系统规模庞大而实际获得的有效数据少, 难以对工程安全风险监控提供足够的支撑。

(2) 信息化的全面性、系统性不足。和水工程安全相关的信息很多, 如设计、地质、施工、环境、结构状态、运行管理、监控模型使用等。很多的信息项目往往只重视结构化数据和自动化数据, 其他方面则关注很少。

**收稿日期:** 2020-12-10

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401809); 中国长江三峡集团公司科研项目(WDD/0507); 山西省重点研发计划资助项目(HKZX-DBAQJK-19); 中国水科院基本科研业务费项目(SS0145B522016); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题(SK2020TS09)

**作者简介:** 卢正超(1969—), 男, 湖南邵东人, 正高级工程师, 硕士, 主要从事大坝安全监测与水利信息化研究。

E-mail: luzc@iwhr.com 通信作者: 聂鼎(E-mail: nieding@iwhr.com)

(3)人工智能技术的应用尚不普遍。意大利最先在大坝安全在线分析评价中引入人工智能技术,20世纪70年代使用混合模型及确定性模型进行在线监控,90年代初采用专家系统技术开发了 DAMSAFE 系统用于大坝安全评价决策支持,开发了 MISTRAL 系统用于处理自动化监测超阈值报警。国内也借鉴有关的经验,2003年前后结合小浪底工程安全监控需要,采用专家系统技术开发了大坝安全监测决策支持系统<sup>[8]</sup>。近年来,大数据、深度学习技术在数据粗差识别等方面得到了较多关注<sup>[9-10]</sup>。但因为缺乏适用的监控指标,模型分析能力不足等原因,实际部署的系统还难以全面满足大坝安全智能化监控的应用需求。

(4)智能化的目标设置偏高。我国于2016年颁布了《智能水电厂技术导则》(DL/T 1547—2016),目前已完成修订稿待批,其中对智能水电厂提出了“五自”(自感知、自学习、自决策、自执行、自适应)的能力目标。有的智能化建设项目甚至还提出了“解放人、取代人、超越人”的目标。

针对水工程安全监测智能化,本文分析了其面临的关键挑战,基于多年的大坝安全监测实践经验,提出了水工程安全监测的“三度”理念,并依据该理念提出了水工程安全监测智能化的合理近期目标及达成目标的“四化”路线。

## 1 水工程安全监测体系的目标与构成

从一般意义上来说,水工程安全监测应聚焦于水工程的总体安全(图1)。其中,本质安全(physical safety)主要取决于工程结构(及其基础)本身,在暴雨、洪水、地震、人为破坏、管理不善等风险因素的作用下,仍有足够的稳定、强度、刚度和耐久性实现预定的功能目标;心理安全(psychological security)主要通过采取信息化等非工程措施,使得工程利益相关者,包括普通群众、工程管理者 and 各级政府能够安心和放心。水工程安全监测体系的任务是为保障上述两个方面的安全提供支撑。工程安全监测体系相对于工程结构来说,是“毛”与“皮”的关系,不可本末倒置。

水工程安全监测体系构成要素如图2所示,具体而言:

“硬件”:传感器、监测装置及相应的采集、传输、存储、供电设备及辅助设施等。

“软件”:设备管理、数据采集管理软件及数据处理与应用软件。

“数据”:与监测系统、工程对象及其环境等有关的静态信息,动态采集的信息,与数据应用相关的信息如监控指标等。

“人”:水工程安全监测体系设计、建设、维护和使用的有关人员。

巧妇难为无米之炊。没有“数据”,就无从了解水工程的历史和现状,工程安全风险管控就是无源之水。“人”则是水工安全监测实践中最活跃、最能动的因素。国内不少的信息智能化项目存在仅仅关注“硬件”和“软件”,忽视“数据”和“人”的不良倾向。

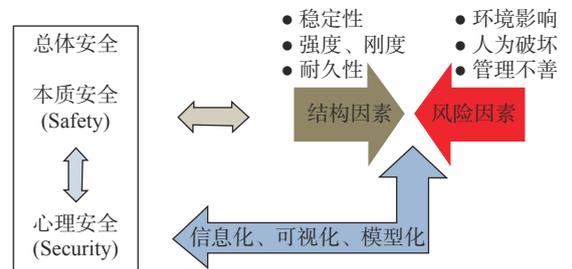


图1 水工程总体安全概念

Fig. 1 Conception of water engineering overall safety

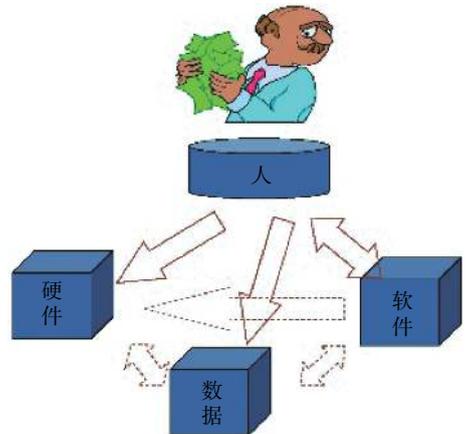


图2 水工程安全监测体系的构成要素

Fig. 2 Elements of water engineering safety monitoring system

## 2 水工程安全监测智能化面临的挑战

### 2.1 监测相关实践中的不确定性与不足

在水工程的设计、施工与运行各阶段,不可避免均会遇到客观和主观上的不确定性。客观上的不确定性,主要指工程区域内结构材料特性在空间分布上的变异性(如天然岩土材料的不均质、各向异性、先天缺陷等)和工程全寿命周期中各类荷载在时间上的变异性(降雨、洪水、冰冻、淤积、地震等自然条件,施工工程质量控制标准不一,运用工作条件变化等)。主观上的不确定性,包括认知的不确定性和决策的不确定性,如土力学计算的本构模型,一般情况下很难分辨 DP 模型、摩尔库伦模型或剑桥模型何者更合适,模型里的参数取值也都存在相当的变化区间难以抉择,很难确定工程全寿命周期中保持持续经济高效运行的允许安全度,确定工程实际的安全程度的方法也难以获得一致认同。

事实上,对水工程全寿命过程的性态,特别是不同阶段的状态转移特征的了解还不充分和深入。据相关文献<sup>[4]</sup>,防洪、发电及引调水工程的 1、2 级建筑物合理使用年限为 100 或 150 年。据国际大坝委员会(ICOLD)2019 年的统计资料,世界范围内 95% 以上大坝的服役年限均小于 100 年,100 m 以上高坝的坝龄全部小于 90 年。国内还没有纯粹因为大坝结构过于老化而退役的案例。

在水工程安全监测方面,技术手段主要包括仪器监测和巡视检查。国内外水工程安全监测中使用最多的钢弦式仪器和差阻式仪器分别发明于 1931 年和 1932 年,业界一般认为其正常使用寿命在 30 年左右。内部埋设的监测仪器在埋设后难以取出进行更新。因此,与水工程 50 年以上的正常使用寿命相比,安全监测仪器的正常使用寿命不匹配,从而在工程正常使用的后期阶段,对其内部的工作状态难以获得准确、完整的信息。并且从本质上来说,水工程安全监测在时空分布上是离散、非连续的,做不到时空全覆盖,因为监测仪器均是事先根据既有的认识和预期选择特定部位进行布置和监测,巡视检查也是选择特定的部位和时机进行的。

此外,实际掌握的监测数据并不多。据我国水利部大坝中心 2018 年最新统计,我国目前水库共计 98 822 座,大型水库占 1%,其中 10% 无安全监测设施,1/3 未建立数据自动采集系统;中型水库占 6%,其中 1/3 无安全监测设施,2/3 未建立数据自动采集系统;小型水库占 93%,其中 90% 以上无安全监测设施,1/2 甚至缺少库水位监测。不仅如此,监测数据在“量”与“质”上往往还存在四个方面的问题:(1)“数多”:即信息来源多、无用垃圾信息多;(2)“数少”:因监测手段与监测过程的时空离散性,仿真计算及其他手段的局限性带来的有效数据少,特别是关键部位可能没有监测仪器设备覆盖,关键时段数据缺测;(3)“数浑”:信息庞杂、层次繁多,信息不准确、不及时、不完整;(4)“数脏”:信息粗差、错误、矛盾充斥。

总之,大坝等水工程对象样本总量不大,结构形式多样,时间跨度各异,可靠的有代表性的监测数据和计算分析成果欠缺。水工程建设与运用中主客观上的不确定性及其蕴含的可能不利后果,即工程面临的风险,决定了水工程安全监测的必要性。但主客观上的不确定性与既有工作基础积累不足,又给水工程安全监测带来实质性的困难。

### 2.2 监测实施过程中多环节带来的易错性

国内一般将水工程安全监测实施全过程分为规划设计、施工、数据采集、数据分析应用四个阶段。文献<sup>[12]</sup>中特别指出:“工程监测不只是监测仪器选择,而是一个逐步推进的完整的过程。该过程始之以目标定义,终之以数据应用,整个过程可分为 25 个环节,每环节都对整个项目的成败起着关键的作用。”其中的 25 个环节包括:(1)预测控制工程性态的机理;(2)明确工程的具体问题;(3)确定每一只仪器的监测目的;(4)确定监测物理量;(5)确定监测量的变幅范围;(6)确定可采取的补救措施;(7)分配参与各方各阶段的任务;(8)确定仪器设备的规格型号;(9)确定仪器设备的安装位置;(10)确定可能影响测值的因素;(11)确定正

确的读数程序;(12)拟定预算;(13)编制仪器设备采购规格说明;(14)编制安装计划;(15)编制仪器校定维护计划;(16)编制数据采集与分析计划;(17)拟定合同条款;(18)设备购置;(19)设备安装;(20)设备维护;(21)数据采集;(22)数据处理;(23)数据分析;(24)报告结论;(25)数据反馈。

在水工程安全监测实施中,多环节串行,又有设计单位、审查部门、供应商、施工承包商、监理、业主等多方参与,灌浆、钻孔、振捣、碾压施工可能造成设备损坏,埋入式设备损坏后不能修复,运行环境恶劣等,都会导致水工程安全监测体系建设不容易达到理想目标,系统上的缺陷和数据中的错误在所难免。

### 2.3 人工智能技术的局限性

人工智能的概念于1956年达特茅斯会议首次提出,在近70年的发展历程中几经沉浮,数次因新技术出现获得空前关注,也数次因商业化的进展不顺遭摒弃<sup>[13]</sup>:

(1)人工智能1.0时代,达特茅斯会议后的20年,主流为符号主义。启发式搜索、知识表示和机器翻译等技术得到了很大发展,后期受制于“组合爆炸”问题难以突破。

(2)人工智能2.0时代,主流为专家系统技术。专家系统可以包含某个领域大量的专家水平的知识或经验,能够根据领域已有的知识或经验进行推理和判断,做出媲美人类专家的决策。后期受制于专家知识获取困难,难以升级维护。

(3)人工智能3.0时代,主流为基于神经网络的机器学习技术。随着高性能计算、大数据时代的到来,人工智能的方法论由前期的推理、演绎,逐渐转到了归纳、综合。2016年AlphaGo取得了巨大成功,短时间内引发全球人工智能热潮。

但总体而言,人工智能发展仍然处在弱人工智能的初级阶段,需要解决的问题还有很多,特别是以深度学习为代表的人工智能还需着力突破在数据瓶颈、泛化瓶颈、能耗瓶颈、语义鸿沟瓶颈、可解释性瓶颈、可靠性瓶颈等方面的问题<sup>[13-14]</sup>。

## 3 水工程安全监测的基本理念及其智能化目标定位

### 3.1 水工程安全监测应秉承的基本理念

从本质上来说,水工程安全监测是一种主观见之于客观的科学实践活动。通过建立水工程安全监测体系,进行数据采集、分析和反馈,提供数据支持、模型支持和扩展支持,监控工程风险、守护工程安全,实现工程安全、经济、高效、兴利除害、可持续的目标。监测的目的不是为了获得数据,而是要获得对工程的认识,以便掌控工程风险,保障工程安全。

为充分发挥“人”的主观能动性,把水工程安全监测工作做好做实,基于多年的监测实践,认为在监测的规划设计、施工、数据采集和数据分析应用各阶段,应在三个维度上践行实事求是的理念,即所谓“三度”的理念。具体阐述如下:

第一,要从哲学的高度来把握水工程安全监测各环节“应该做什么”和“能够做什么”。在水工程监控体系规划设计及运行管理中,要坚持唯物辩证论的世界观及普遍联系、层次化结构和动态演变的系统观,把握工程性态变化中具体的因果关系;在监测设计中,要把握矛盾的特殊性,考虑工程结构的长度、高度、体积(大体积还是薄壁结构)、线型(直线型还是曲线型)、结构型式(整体式还是分离式)、交通条件、需要监测的范围与关键部位、是否需要动态监测等特点,因地制宜选择监测技术手段;在运行阶段要紧密围绕安全监测中的主要矛盾,即大洪水、地震等不利环境影响、人为破坏、管理不善等风险因素与工程结构抗力(稳定、强度、刚度和耐久性)的矛盾,以及安全相关信息的需求与有效供给这一次要矛盾,尤其是要时刻关注水工程风险这一最活跃主动的因素;在数据采集及分析中,要把握“质”和“量”的统一即“度”,确定工程性态的发展阶段,选择数据采集的时间点、不错过关键阶段的数据,并选择合适的分析模型和监控指标来分析监测数据时空演变规律;此外,在数据分析、风险管控及决策中,在主观认知上需妥善处理必然与偶

然、主观与客观、模糊与精确、数量与质量、定性与定量、历史与现实等矛盾,以获得比较到位的认识,做出合乎实际的判断和明智的决策。

第二,要从理性的角度来确定水工程安全监测合理的范围和程度,在资源投入方面不能不计成本、不计后果。技术上,要考虑采用的“硬件”和“软件”是否实用可靠?能否满足各种条件下长期监测的需要?是否足够先进,能否适应未来发展的需要?经济上,要考虑投入是否和监测对象的价值或风险匹配,是否存在资源投入过度的情况?安全上,要考虑是否因为监测仪器设备的引入,给原来的工程结构带来了风险?是否减小了结构的有效尺寸?是否影响施工给工程带来了实体质量缺陷?是否因为设备或电缆过于集中,形成了渗漏通道?是否因为监测系统防雷接地不合格,给相关系统带来雷电破坏风险?

第三,要自始至终秉承真诚的态度将值得做的事做好做实。态度决定高度,态度决定成败。对于任何水工程,客观上都或多或少存在未知的风险因素。工程安全无小事,从业人员必须自始至终秉承真诚的态度,时刻保持“战战兢兢,如临深渊,如履薄冰”戒惧谨慎的心态,不忘初心,慎终如始,求真务实。

毋庸讳言,国内有相当数量的工程未能笃行“三度”理念,水工程安全监测的针对性不强,规模失当,耗费了大量的物力财力,浪费了大量的精力,效果还不佳,教训十分深刻。

### 3.2 水工程安全监测智能化的目标定位

水工程安全监测智能化是智慧水利中水工程建设管理的重要组成部分。基于上述的“三度”理念,考虑到前述水工程设计、施工、运行中面临的各种主客观上的不确定性,监测工作的特殊性和局限性,以及现阶段人工智能技术的成熟度,水工程安全监测智能化不宜估计过高,目前难以完全实现“解放人、取代人、超越人”的目标。近期现实可行的目标是:建立具备“泛在互联、透彻感知、深度分析、精细管理、个性服务”能力的水工程安全监测体系,在做好信息化的前提下,超越信息化,实现能动化,对工程既有缺陷隐患看得见、说得清,对未来安全风险想得透、管得住。相应地,水工程安全智能化监测体系的定位是:日常运行中当好风险预警安全可放心的守护人,应急处置时当好灾害防控决策可依赖的助手。

## 4 水工程安全监测智能化的“四化”路线

考虑到上述水工程安全智能化监测体系的功能目标定位,“硬件”、“软件”、“数据”和“人”的完美结合将是水工程安全监测智能化的主流方向。前三者基本与人工智能三要素<sup>[13]</sup>“算力”、“算法”“数据”相对应。水工程安全监测要超越常规信息化,实现能动化,必须做好如下四个关键环节(即“四化”),如图3所示。具体而言:

(1)自动化。利用基于物联网的智能传感器,仪器监测全过程自动化(即传感器埋设后遂行自动化),外部变形监测自动化,巡视检查视频监控自动化,以及其他物联网、云计算、大数据等新一代信息通信技术等手段实现泛在互联、透彻感知,保障动态实时数据源源不断,特别是关键时刻保持在线。

(2)全信息化。所谓的全信息化,基于面向系统、面向主体(工程+环境+人),包括主体信息、支撑信息、效用信息等<sup>[15]</sup>。对工程安全而言,全信息化包括工程相关信息设计、地质、施工、环境、结构状态、运管,模型相关信息等进行全面的收集和管理。信息包括客观信息和主观信息,静态信息和动态信息,结构化信息和非结构化信息。对非结构化信息的描述,隐含驱动未来行为。

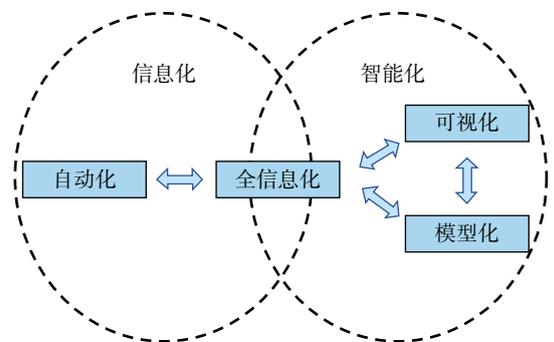


图3 水工程安全监测信息化与智能化的关键环节  
Fig. 3 The key links of conventional informationization and intelligentization of water engineering safety monitoring

(3)可视化。一幅图胜过千言万语。受限于人脑在信息感知和推理方面的处理能力,在大数据时代,对海量的数据必须进行可视化的萃取凝练。考虑到水工程安全监测系统的信息使用者有多层次的需求,宜针对不同层级的用户需求,建立工程性态专题图册,以可视化的方式展示工程安全相关信息的时空分布规律、因果关联关系、风险事件演进过程。这样在工程风险管控过程中,特别是在应急抢险过程中,可以及时掌握工程性态和工程风险,做出合乎实际的判断和明智的决策。

(4)模型化。模型化是智能化的核心,是水工程风险管控中实现风险指引、动态监控、主动应对的关键。模型有多种<sup>[16]</sup>,如物理模型、半物理模型、数学模型。数学模型包括人工智能各种算法,以及其他确定性模型、混合模型、随机模型等。不同的模型有不同的作用,如统计模型可以把握随机现象中的统计规律,非线性模型可以把握非线性过程。人工智能中深度神经网络是某种非线性函数对未知函数在有限样本数据上映射关系的拟合。模型有结构化和非结构化之分,也有不同的层次之分。水工程安全监测智能化最重要的基础模型,应是基于数字孪生技术(Digital Twin)<sup>[17]</sup>建立工程对象及其安全监控体系的统一信息物理模型,便于水工程安全监测体系的四要素高度融合,聚焦于工程总体安全,进行仿真分析、预测、诊断、模拟演练,并将仿真结果进行反馈,实现工程对象与安全监测体系特别是“人”无缝衔接,辅助工程安全风险监控优化和决策。

水工程全寿命过程中内蕴各种不确定性。没有自动化,就难以及时获得结构和环境的实时性态;没有全信息化,水工程风险防控的判断和决策将失去坚实的基础;没有可视化,“人”将被“数据”淹没;没有模型化,“人”对水工程的认识最多停留在主观、表面、片面、静止、孤立的层次上。总之,全信息化、可视化和模型化是超越常规信息化,实现智能化的关键所在。

## 5 结 语

应在充分信息化的基础上建设智慧水利,而智慧水利的成功实施有赖于各应用系统的智能化及协调配合融为一体。水工程安全监测智能化是智慧水利建设中的一项重要内容,对保障工程结构本质安全及利益相关群体获得心理安全非常重要。

人工智能技术的成熟度决定了水工程安全监测智能化的现实目标的边界。当前人工智能仍处于弱人工智能的初级阶段,距离“很好用”还有数据、能耗、泛化、可解释性、可靠性、安全性等诸多瓶颈。与智慧水利匹配的自感知、自学习、自决策、自执行、自适应能力,有赖于可靠、可解释的人工智能算法与模型进行诊断和预测,只能是远期目标。在当前水工程安全监测智能化实践中,必须抓住问题的关键,把信息化、可视化和模型化工作落到实处,超越信息化实现智能化,才能以经济高效可持续的方式实现监控工程风险保障工程安全的目标。

**致谢:**感谢中国水利水电科学研究院水电中心杨波正高级工程师对本文提出的建设性意见。

## 参 考 文 献:

- [1] 张建云,刘九夫,金君良.关于智慧水利的认识与思考[J].*水利水电工程学报*,2019(6):1-7.(ZHANG Jianyun,LIU Jiufu,JIN Junliang.Understanding and thinking of smart water conservancy[J].*Hydro-Science and Engineering*,2019(6):1-7.(in Chinese))
- [2] 卢正超,黎利兵,范哲,等.水利信息化背景下对我国大坝安全管理工作的几点思考[C]//中国水利学会,中国水力发电工程学会,中国大坝工程学会.第一届全国水利水电工程信息化技术研究与应用研讨会会议论文集.北京:中国水利学会,中国水力发电工程学会,中国大坝工程学会,2016:328-332.(LU Zhengchao,LI Libing,FAN Zhe,et al.China Hydraulic

- Engineering Society, China Society for Hydropower Engineering, China Dam Engineering Society(CHINCOLD). Reflections on China's practices in dam safety management with respect to water resources informatization[C]//Proceedings of the First National Symposium on Information Technology Research and Application of Water Resources and Hydropower Projects. Beijing: China Hydraulic Engineering Society, China Society for Hydropower Engineering, China Dam Engineering Society(CHINCOLD), 2016: 328-332. (in Chinese))
- [3] 何向阳, 谭界雄, 高大水, 等. 基于云平台的水库安全管理信息化方案研究[J]. 人民长江, 2019, 50(11): 233-236. (HE Xiangyang, TAN Jiexiong, GAO Dashui, et al. Study on information solution of reservoir safety management based on cloud platform[J]. Yangtze River, 2019, 50(11): 233-236. (in Chinese))
- [4] 胡静宁. 宁夏“互联网+智慧水利”信息化建设与成效[J]. 工程建设与设计, 2019(20): 262-263. (HU Jingning. Information construction and effect of “Internet +Wisdom Water Conservancy” in Ningxia[J]. Construction & Design for Project, 2019(20): 262-263. (in Chinese))
- [5] 葛召华. 山东省智慧水利建设的认识与思考[J]. 水利信息化, 2019(5): 6-8, 19. (GE Zhaohua. Understanding and thinking on construction of smart water conservancy in Shandong Province[J]. Water Resources Informatization, 2019(5): 6-8, 19. (in Chinese))
- [6] 卢鑫, 刘双美, 郭翔宇, 等. 四川省智慧水利建设构想与思考[J]. 水利信息化, 2019(3): 4-9. (LU Xin, LIU Shuangmei, GUO Xiangyu, et al. Thoughts on smart water conservancy construction in Sichuan Province[J]. Water Resources Informatization, 2019(3): 4-9. (in Chinese))
- [7] 蒋云钟, 冶运涛, 赵红莉, 第. 水利大数据研究现状与展望[J]. 水力发电学报, 2020, 39(10): 1-32. (JIANG Yunzhong, YE Yuntao, ZHAO Hongli, et al. Research status and prospects on water conservancy big data[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(10): 1-32. (in Chinese))
- [8] 张进平, 黎利兵, 卢正超, 等. 大坝安全监测决策支持系统的开发[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(2): 84-89. (ZHANG Jinping, LI Libing, LU Zhengchao, et al. Development of decision-making support system for dam safety monitoring[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003, 1(2): 84-89. (in Chinese))
- [9] 孙辅庭. 大坝安全监测数据粗差智能识别技术研究[C]//中国水力发电工程学会大坝安全专业委员会2019年会暨“大坝安全现场检查评估与补强加固”学术交流会议论文集. 普洱: 中国水力发电工程学会, 2019: 79-84. (SUN Futing. Research on intelligent identification technology of gross errors in dam safety monitoring data[C]//Proceedings of the 2019 Annual Meeting of Technical Committee on Dam Safety of China Society for Hydropower Engineering & Symposium on “On-site Inspection and Evaluation of Dam Safety and Reinforcement”. Puer: China Society for Hydropower Engineering, 2019: 79-84. (in Chinese))
- [10] 金鑫鑫, 卢正超. 随机森林方法在监测数据粗差识别中的研究与应用[C]//中国水力发电工程学会大坝安全专业委员会2019年会暨“大坝安全现场检查评估与补强加固”学术交流会议论文集. 云南: 中国水力发电工程学会, 2019: 85-89. (JIN Xinxin, LU Zhengchao. Research and application of random forest method in gross error identification of monitoring data[C]//Proceedings of the 2019 Annual Meeting of Technical Committee on Dam Safety of China Society for Hydropower Engineering & Symposium on “On-site Inspection and Evaluation of Dam Safety and Reinforcement”. Puer: China Society for Hydropower Engineering, 2019: 85-89. (in Chinese))
- [11] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范: SL 654—2014[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for rational service life and durability design of water resources and hydropower projects: SL 654—2014[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2014. (in Chinese))
- [12] 约翰·邓尼克利夫. 岩土工程监测[M]. 卢正超, 黎利兵, 姜云辉, 等, 译. 北京: 中国质检出版社, 2013. (DUNNICLIFF J. Geotechnical instrumentation for monitoring field performance[M]. LU Zhengchao, LI Libing, JIANG Yunhui, et al, trans. Beijing: China Quality Inspection Press, 2013. (in Chinese))
- [13] 国务院发展研究中心国际技术经济研究所, 中国电子学会, 智慧芽. 人工智能全球格局: 未来趋势与中国位势[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2019. (Institute of International Technology and Economics of Development Research Center of the State Council, Chinese Institute of Electronics, PatSnap. Global situation of artificial intelligence: future trend and China's potential[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2019. (in Chinese))
- [14] 谭铁牛, 孙哲南, 张兆翔. 人工智能: 天使还是魔鬼?[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(9): 1257-1263. (TAN Tieniu, SUN

- Zhe'nan, ZHANG Zhaoxiang. Artificial intelligence: angel or devil?[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2018, 48(9): 1257-1263. (in Chinese))
- [15] 谢耘. 智慧化未来: “暴力计算”开创的奇迹[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018. (XIE Yun. Intelligent future: the miracle created by “brute force computing” [M]. Beijing: China Machine Press, 2018. (in Chinese))
- [16] 刘兴堂. 现代辨识工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. (LIU Xingtang. Modern identification engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese))
- [17] 张霖. 关于数字孪生的冷思考及其背后的建模和仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(4): 1-10. (ZHANG Lin. Cold thinking on digital twins and the modeling and simulation technology behind it[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(4): 1-10. (in Chinese))

## Intelligent water engineering safety monitoring: challenges, goals and roadmap

LU Zhengchao<sup>1,2</sup>, YANG Ning<sup>3</sup>, WEI Yaoguo<sup>4</sup>, LI Libing<sup>2</sup>, NIE Ding<sup>2</sup>, JIANG Yunhui<sup>2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China*; 2. *Research Center for Hydropower Sustainable Development, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*; 3. *China Three Gorges Construction Management Co., Ltd., Chengdu 610000, China*; 4. *Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Beijing 100038, China*)

**Abstract:** In recent years, China has made great progress in water conservancy informatization and is now gearing up to implement smart water conservancy. However, the specific goals, standards and technical routes of its intelligent application systems are still under exploration. Intelligent engineering safety monitoring is an indispensable component of intelligent water conservancy, and the boundary of its realistic goals is determined by the maturity of AI technology. In light of the status quo of AI technology and based on our experience in dam safety monitoring for several decades, in this study the radical challenges of intelligent engineering safety monitoring were analyzed systematically, and the three cardinal ideas in intelligent scheme formulation and implementation, the realistic goals and roadmap, were put forward definitively. First, we have to decide “what should be done” and “what can be done” from the philosophical points of view, evaluate the reasonability of the scheme from the aspects of technology, economy and safety, and maintain a sincere attitude from the very beginning to the end to get it well done. Second, intelligent engineering safety monitoring should be focused on the principal contradiction between engineering risk and structural resistance, besides the demand and effective supply of information related to engineering safety, and currently its realistic goals should be directed towards identifying the existing structural distress in an explainable way, foreseeing the engineering safety risks and keeping them under control. Third, four key steps, including automated monitoring, full informatization, visualization and modelling, are essential to surpassing conventional informationization and realizing the real intelligentization. With these concepts being well implemented, a solid foundation will be laid for the successful implementation of smart water conservancy.

**Key words:** water engineering; intelligent engineering safety monitoring; informatization; smart water conservancy